

浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果

Characteristics of heat and moisture transport of permeable pavement

藤野 毅*・柴原千浩**・浅枝 隆***・村瀬範芳****・和氣亜紀夫*****

By Takeshi FUJINO, Chihiro SIBAHARA, Takashi ASAEDA, Noriyoshi MURASE and Akio WAKE

Heat flux of permeable pavement are estimated and compared with that of bair soil or asphalt pavement in summer. moreover, it was appeared that charastaristics of heat and moisture of permeable pavement was similar to that of soil and sand, respectively.

As the result, permeable pavement was proved to be effective to relief for heating the atmosphere.

key words; permeable pavement, heat flux, evaporation, heat island

1. はじめに

都市活動が盛んになるにつれ、都市域の温度が周辺より高くなる現象すなわちヒートアイランド現象はますます激しさを増してきている。昨今の東京中心から埼玉県にかけての真夏の日中の気温は37度程度にまで上昇しており、21世紀には43度にまで達するという予測もあるほどである。この対策として、河川や池の利用、緑化地域の増加等の方策が考えられている。しかし、実際に過密な都市の中に池や緑化地域を配置するのは必ずしも簡単なことではない。ところで筆者らはこれまでアスファルト、コンクリート等の舗装の吸熱、蓄熱特性に着目し研究を行い、これらの舗装が都市のヒートアイランドに対して最も大きな影響を及ぼしていることを明らかにしてきている(浅枝ら(1991))。しかもこれらの舗装は、日中熱を吸収し、その熱を夜間大気に放出するという過程を繰り返すため、夜間のヒートアイランド(熱帯夜)に対しても大きなシェアを

-
- * 学生員 工修 埼玉大学大学院
(〒338 浦和市下大久保 255)
- ** 学生員 埼玉大学大学院
- *** 正会員 工博 埼玉大学工学部
- **** 不二見セラミック
(〒101 千代田区内神田1-9-12)
- *****正会員 Ph.D 清水建設技術研究所
(〒135 江東区越中島 3-4-17)

しめている。こうしたことを考慮すれば、舗装に対して工夫をすることは直接的に熱環境を緩和するきわめて効率的な方法である。すなわち、日中に舗装表面の温度が極端に上がらないようにすれば、日中の気温上昇を弱めることが出来、また、舗装内に熱を蓄熱させなければ夜間のヒートアイランドはきわめて大きく軽減できる。このような観点から、浸透性舗装に着目し、まずは観測によりその効果を明らかにするために、夏期において熱収支観測を行った。なお、今回本研究で使用した浸透性舗装材は、下水汚泥消却灰と骨材を主原料とした浸透性舗装ブロック（以下、セラミックと呼ぶ）である。

2. 観測概要

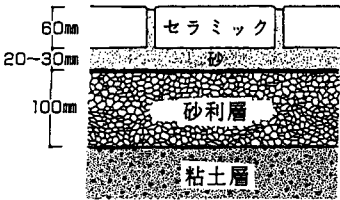
観測は、93年8月と9月の晴天日に、埼玉大学構内(35° 53' N, 139° 36' E)において12日間行われた。周囲に遮るものがないグラウンドの端に縦横20×10cm、厚さ6cmのセラミックを面積が9 m²になるように敷き詰めた。さらに舗装の周りを10cm厚の断熱材で囲み、周囲の熱や水分の影響を受けないように配慮した。セラミックの内部とその下の地中には温度センサーを埋設して、深さ方向の温度分布が求められるようにした。なお、地表面のアルベドの違いによる効果を調べるために、セラミックの表面の色は赤とグレー、及び白の3通り作成した。舗装面より下の材質は、赤いセラミックについては路床となる粘土層(以下、土と呼ぶ)だけであるが、グレーと白のセラミックについては、実際の施工法に基づき、路床の上に砂層と砂利層を設置している(図1)。地上では、1.5mの高さにおいて気温、湿度、風速、日射、大気放射、地表面からの赤外放射、及び地表面アルベドを計測した。また、3～6時間ごとにそれぞれのセラミック舗装面から1個のブロックを抜き出し、ブロック自身と、その下の土、あるいは砂の体積含水率を測定した。以上のような方法で熱収支測定を行い、同時に既存のアスファルト舗装面と裸地面との比較も行った。

3. 浸透性舗装材の物性

観測に用いたものと全く同じ材質のものを用いて、室内実験によりセラミックの熱伝導率、熱容量、及び飽和体積含水率を測定した。熱伝導率は円筒状のセラミックを用いて熱の拡散式から求めた。また飽和体積含水率は湿潤状態の水中重量、自然状態の空中重量、及び強制湿潤状態の空中重量から飽和含水比を求め、それに乾燥密度をかけて算定した。表-1にこれらの物性値を示す。比較のために、浅枝(1991)らと藤野・浅枝(1992)の観測で得られた他の舗装体の物性値も示す。これより今回使用したセラミックの熱伝導率、熱容量の値はアスファルトと比べて小さく、乾燥土に近い物性であり、間隙率や飽和体積含水率については砂に近い物性であることが判明した。

表-1 観測に使用した供試体の物性(＊＊はデータなし)

種類	熱伝導率 (W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	熱容量 (J・cm ⁻³ ・K ⁻¹)	間隙率 (%)	飽和体積含水率 (%)
アスファルト	0.74	1.42	—	—
セラミック*	0.08	1.14	31.74	27.89
乾燥土	0.04	1.15	16.5	＊＊
湿潤土	0.17	1.94	＊＊	＊＊
砂	0.62	1.94	30.00	30.00



セラミックのアルベドは赤：0.15、グレー：0.10、白：0.45（観測値（正午）） 図1 浸透性舗装の断面図

4. 観測結果

特に晴天であった8月1日の観測結果について図2に地表面温度の日変化を、図3(a)-(c)に地中温度分布をそれぞれ示す。まず、それぞれの地表面温度の日変化を比較すると、日中の最高温度は、アスファルト舗装面が60°Cまで達するのに対し、セラミックでは表面の色が赤とグレーのものでは52°C、白いものでは43°Cにとどまり、特に白い面ではアルベドが大きいいため、土の50°Cよりも低い結果となった。次にそれぞれの地中温度を比較すると、日中アスファルト舗装面は、地下20cmの深さまで多量の熱を伝えているのに対し、セラミックでは表面近く、つまりセラミック自身においてのみ熱を貯え、地中の温度分布は土に近い挙動を示していることがわかる。セラミックの地表面温度と地中温度分布が同じく“舗装”であるアスファルトよりも土に近くなる要因は、低い熱伝導率と舗装内の水分蒸発による潜熱輸送の効果にあると考えられる。以上は、温度だけからセラミックの熱特性を推測したものであるが、それぞれの地表面に出入りする熱量を定量的に評価し、比較を行うことによって、セラミックの大気加熱の緩和効果をさらに明瞭に表現することが可能となる。そこで次に、以下のような算定式を用いてそれぞれの地表面の熱収支を見積った。

まず、地表面の熱収支式は次式で表される。

$$S(1-\alpha) + L - \sigma T_s^4 = H + I E + G \quad (1)$$

ここで、 S ：日射、 α ：アルベド、 L ：大気放射、 σT_s^4 ：地表面からの赤外放射、 H ：顕熱輸送量、

$I E$ ：潜熱輸送量、 G ：地中への伝導熱。

式(1)左辺の各放射量は実測値を用いて表せる。

右辺の各熱輸送量の見積りについて、まずそれぞれの G の値は地中温度分布から、

$$G = \rho_s c \int_0^z \frac{dT}{dt} (z) dz \quad (2)$$

で見積った。ここで、 $\rho_s c$ ：それぞれの地中の熱容量、 T ：地中温度、 t ：時間。

次に、 H の算定については、しばしばバルク式が用いられるが、観測日の風速が1m/s前後と弱かったことと、どの地表面温度も気温よりも20°C以上も高いことから、このような条件のもとでは地表面から大気への熱輸送は自然対流によるものが支配的になると考えられる。従ってここでは、せん断層内の風による熱輸送と自然対流による熱輸送の両者の効果を考慮したLouis(1979)の算定式により H の値を見積った。すなわち、

$$H = \rho_a c_D \frac{a^2}{N} U (T_s - T_a) F_h \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right) \quad (3)$$

ここで、 $\rho_a c_D$ ：空気の熱容量、 a^2 ：抵抗係数、 U ：風速、 T_s ：地表面温度、 T_a ：気温、

z_0 ：表面粗度、 z ：高さ1.5m、 Ri_B ：バルクリチャードソン数、 N ：定数(=0.74)。

F は z と Ri_B の関数で、次式で表される。

$$F_h = 1 - \frac{b Ri_B}{1 + c |Ri_B|^{1/2}} \quad \text{不安定の時} \quad (4)$$

$$F_h = \frac{1}{(1 + d Ri_B)^2} \quad \text{安定の時} \quad (5)$$

ここで、 b 、 c 及び d は定数である。

Ri_B 、 a^2 はそれぞれ次式で定義される。

$$R_{1B} = \frac{g z \Delta T}{T_a U^2} \quad (6)$$

$$a^2 = k^2 / \left(1 + n \frac{z}{z_0} \right)^2 \quad (7)$$

ここで、 $\Delta T = T_s - T_a$ 、 g ：重力加速度、 k ：カルマン定数。

最後に1Eは式(1)左辺の正味放射量の値からH+Gの差引により求めた。又、アスファルトの表面は充分乾いていたため1E=0とした。以上のような方法でそれぞれの舗装面及び裸地面の熱収支を見積った。その結果を図4(a)-(e)に示す。まず、それぞれの地表面において、大気加熱に直接寄与する顕熱輸送量を比較すると、アスファルト舗装面からではその値が日中最高400W/m²近くに達するのに対し、赤とグレーのセラミックからでは200W/m²程度、裸地面では100W/m²に抑えられている。特に白いセラミックでは、アルベドによって正味放射量が小さくなるため、地表面は加熱されず顕熱輸送量も100W/m²程度に留まる。夜間でみても、アスファルト舗装面では、日中地中に入った多量の熱を放出するため、その値は夜間の平均で50W/m²にもなるが、セラミックでは10W/m²程度と極めて小さな値となり、セラミックによる夜間での大気加熱の寄与はほとんどなくなる。このように、裸地面と比較してわかるようにセラミックから大気への顕熱輸送量は、アスファルト舗装面よりも地表面が自然のままの状態に近くなる。次に、裸地面とセラミックからの潜熱輸送量を比較すると、まず裸地面のほうがどのセラミックよりも多量に放出されているのがわかる。この差を評価するために、セラミックと裸地面の土の体積含水率の比較を行った。その結果を図5(a)-(d)に示す。ここで示したグラフは、12日間に渡って採取したものの平均値で表している。ただし、セラミックについては表面から深さ6cmまでの平均値で表している。まずその日変化については、どれも昼間は蒸発によってその値は下がり、夜間は吸引圧によって下から水分が補給されるため、再び増加する傾向にある。次にこれらの絶対量を比較すると、土の体積含水率が深さ10cmのところで50%前後であるのに対し、セラミック自身の体積含水率は23%程度である。また、セラミックの下に位置する砂の体積含水率もセラミックとほとんど同じ値を示している。この差が日中の潜熱輸送量の差となって現れることがわかる。

5. おわりに

浸透性舗装の熱収支を調べた結果、これが既存のアスファルト舗装にとって変わることによって、ヒートアイランドが緩和されることが十分期待できることがわかった。現段階では、荷重制限の問題もあり、その適用範囲は限られているが、今後改良を重ねることによって、多岐に渡って活躍するという期待が十分に持てる。最後に、セラミックの制作に協力して頂いたアイエヌティ都市開発の藤山修、成沢孝敏両氏に記して感謝する。

参考文献

- 1) 浅枝隆・永沼崇彦・鈴木水弘・塩崎修男：都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果，第35回水理講演会論文集，pp.591-596，1991.
- 2) 浅枝隆・藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について、水文・水資源学会誌、pp.3-7，1992.
- 3) T.Asaeda, A.Wake and Vu Thanh Ca : Solar heating of pavement and its Effect on lower atmosphere , Atmospheric Environment (submitted)
- 4) T.Asaeda, Vu Thanh Ca : The surface transport of heat and moisture and its effect on the environment : a numerical model, Boundary-Layer Meteorology (in press)
- 5) Louis, J.K. : A Parametric Model of Vertical Eddy Fluxes in the Atmosphere : Boundary-Layer Meteorol.17, pp.187-202, 1979.

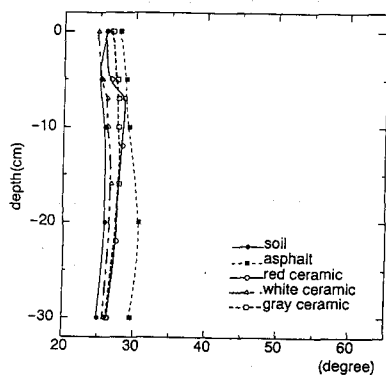
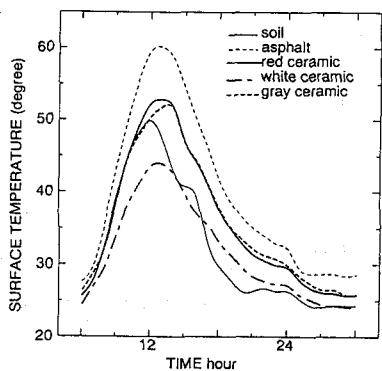
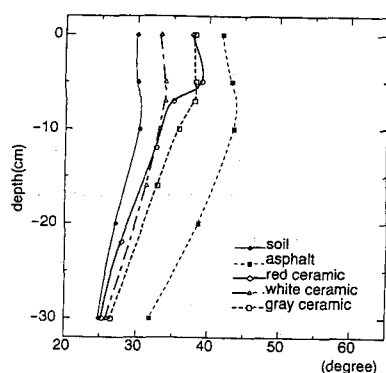
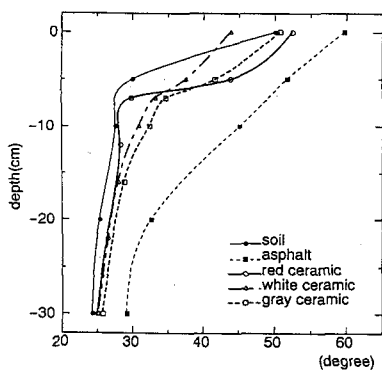


図2 地表面温度の日変化(93年8月1日)

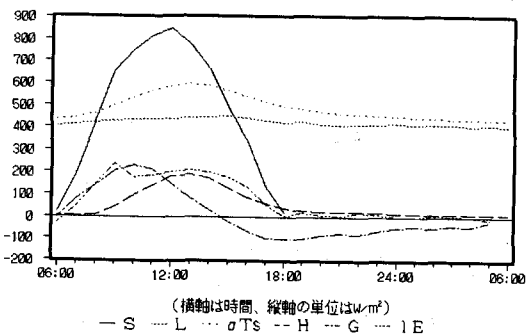
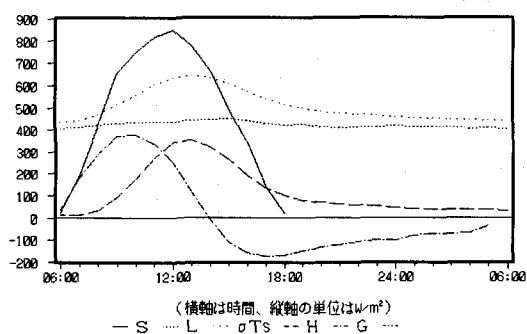
(a) 午前6時



(b) 正午

(c) 午後6時

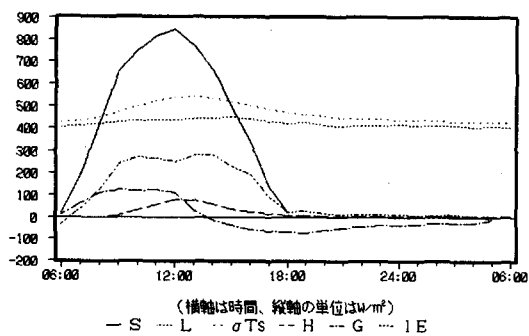
図3 地中温度分布図(93年8月1日)



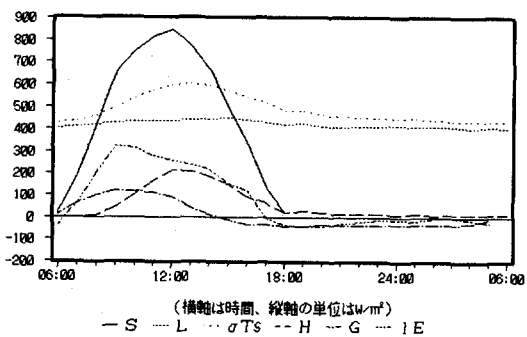
(a) アスファルト

(b) セラミック(グレー)

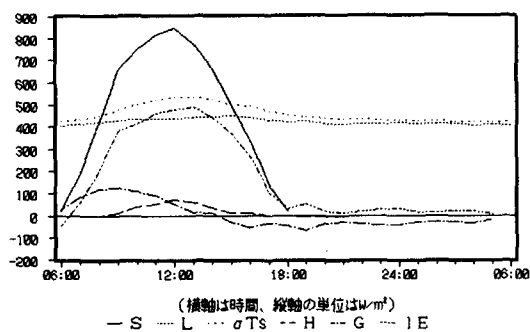
図4 地表面の熱収支(12日間の平均)



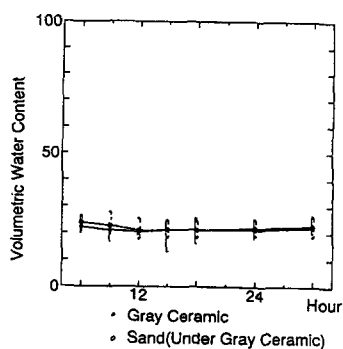
(c) セラミック (白)



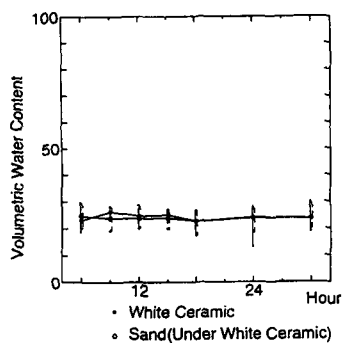
(d) セラミック (赤)



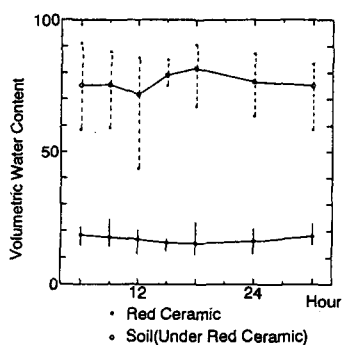
(e) 裸地



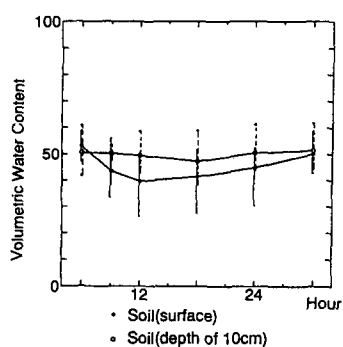
(a) セラミック (グレー)



(b) セラミック (白)



(c) セラミック (赤)



(d) 裸地

図5 体積含水率の日変化 (12日間の平均)